

ZINC 2012

MATIÈRES PREMIÈRES :

La teneur moyenne en zinc de l'écorce terrestre est de 80 ppm.

Les émissions atmosphériques naturelles de zinc liées au volcanisme, à l'érosion des roches... sont estimées à 5,9 millions de t/an. Les émissions liées aux activités humaines sont estimées à 57 000 t/an.

Dans les minerais, le zinc est très souvent associé à [Pb](#) et [Cd](#) ainsi qu'à [Fe](#), [Cu](#), Bi, [Sb](#), As, Ge, In, [Ag](#), [Au...](#) Les minerais de zinc sont la principale source de cadmium, germanium et indium.

Minerais : principal : blende ou sphalérite (ZnS), autres : smithsonite (ZnCO₃), hémimorphite ou calamine (Zn₄Si₂O₇(OH)₂.H₂O). La blende représente 95 % de la production minière.

La teneur des minerais tout venant est comprise entre 4 et 20 % de Zn. 80 % des exploitations minières représentant 64 % de la production sont souterraines, 8 % (15 % de la production) à ciel ouvert et 12 % (21 % de la production) associent les 2 types d'exploitation. En 2009, il y a 144 mines en exploitation dans le monde.

Minéralurgie ou concentration :

Après extraction du minerai, celui-ci subit un traitement physique consistant à éliminer une grande partie de la gangue. Dans le cas des minerais sulfurés, une flottation est généralement effectuée. La flottation consiste à séparer d'une part les parties valorisables d'un minerai et d'autre part la gangue, en jouant sur leurs propriétés de surface et plus particulièrement sur le caractère hydrophobe ou hydrophile (mouillant) de celles-ci.

Avant de pouvoir séparer les constituants du minerai, il faut "libérer" les particules valorisables par broyage qui sera d'autant plus poussé que, par exemple les sulfures métalliques à récupérer, seront disséminés dans le minerai sous forme de fines particules. Ainsi, les blocs de quelques m³ extraits de la mine seront broyés jusqu'à atteindre quelques dizaines à quelques centaines de micromètres.

La flottation est réalisée dans des cuves dans lesquelles le minerai broyé est mis en suspension aqueuse. Des ajouts éventuels sont effectués pour ajuster le pH, modifier les propriétés de surface des particules à l'aide de collecteurs, former des mousses stables. D'autres ajouts permettent de moduler l'action des agents collecteurs : des déprimants augmentent le mouillage, des activants annihilent les effets des déprimants. Par ailleurs, une arrivée d'air permet de former des bulles qui entraînent en surface les éléments valorisables qui se retrouvent dans des mousses en formant une écume. Cette dernière, après séchage, donne des concentrés.

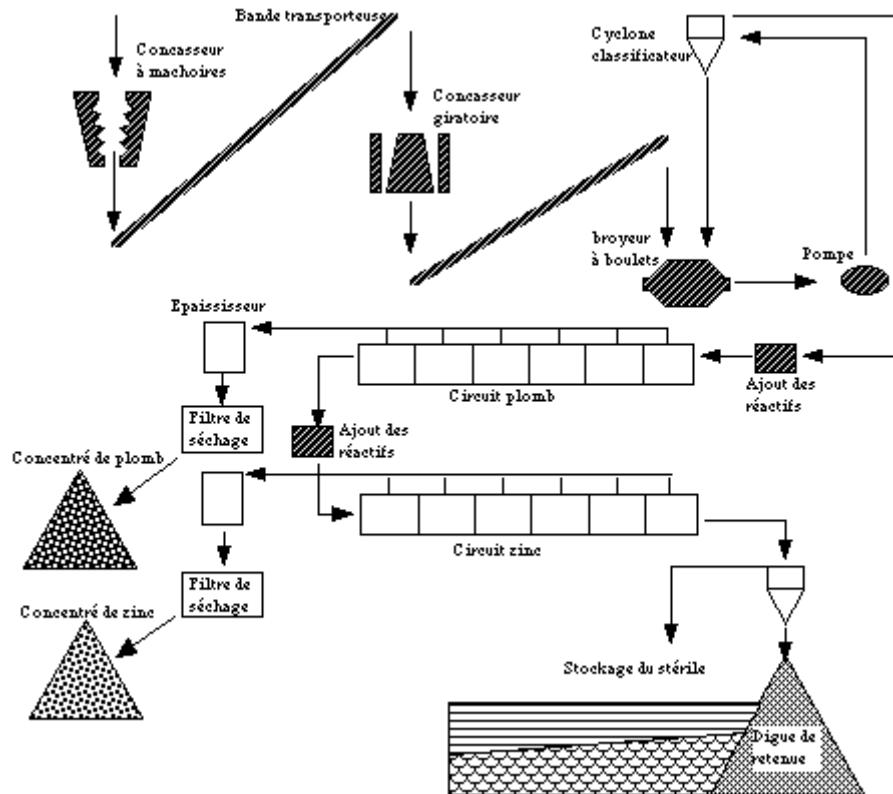
Il est également possible de séparer sélectivement divers sulfures métalliques d'une part de la gangue et d'autre part entre eux.

Après flottation les concentrés contiennent de 40 à 60 % de Zn (en moyenne 53 %) sous forme de sulfure de zinc ZnS. Lors de la flottation le zinc n'est pas transformé chimiquement, il reste sous forme de sulfure.

En général, la concentration est effectuée dans des installations voisines de l'extraction minière, les

concentrés étant évacués, par voie maritime, vers les installations de traitement métallurgique. Le schéma ci-dessous illustre les opérations de concentration par flottation.

Schéma de principe d'un circuit de flottation différentielle



Exemple de flottation concernant un minerai contenant de la blende, de la pyrite et de la [galène](#), dans une gangue de [calcite](#) et de [dolomie](#).

Broyage : le minerai a été broyé pour que 80 % du produit passe au tamis de 170 microns.

Flottation : les résultats moyens du traitement par flottation sont les suivants :

Produits	Masse en %	Teneur en Pb	Teneur en Zn
Tout-venant	100,0	5,7	6,9
Concentré galène	7,2	70,9	3,6
Concentré blende	10,3	0,5	52,1
Rejet final	82,5	0,7	1,6

Consommations de réactifs :

	Circuit plomb		Circuit zinc
CaO	1500 g/t	CaO	2560 g/t

NaCN	70 g/t	CuSO ₄	300 g/t
Ethyl et amyloxanthate	70 g/t	Ethyl et amyloxanthate	120 g/t
Huile de pin	5 g/t		

Composition des concentrés obtenus :

Éléments	Concentré galène	Concentré blende
Zn %	4,7	50,3
<u>S</u> %	16,7	31,5
<u>Pb</u> %	70,0	1,0
<u>Cu</u> %	1,0	0,50
<u>Cd</u> %		0,15
<u>Fe</u> %	6,0	11,10
<u>Sn</u> %		0,007
Bi %	0,02	
CaO %	0,6	0,5
MgO %		0,3
<u>SiO₂</u> %	0,4	0,25
Al ₂ O ₃ %		0,8
<u>Ag</u> g/t	800	70
<u>Sb</u> g/t	0,2	0,01
As g/t	0,3	0,15

Productions minières : en 2012, en milliers de t de Zn contenu. Monde : 13 604, Union Européenne (Irlande, Suède, Pologne, Finlande..., en 2011) : 732.

Chine	4 600	Canada	640
Australie	1 490	Mexique	630
Pérou	1 270	Bolivie	430

Etats-Unis	748	Kazakhstan	420
Inde	690	Irlande	345

Source : USGS

Principaux pays exportateurs : Pérou, Etats-Unis (448 000 t de Zn contenu, en 2012), Mexique, Bolivie, Irlande, Suède.

Principaux pays importateurs : Chine (821 000 t de zinc contenu, en 2012), Corée du Sud, Japon, Espagne, Pays Bas, Belgique.

- Depuis 2008, la plus importante mine de zinc dans le monde est celle de Rampura-Agucha, dans le Rajasthan, en Inde, exploitée par [Vedanta Resources](#). Sa production a été, en 2011-12, de 649 583 t de zinc et 59 898 t de plomb. Les réserves prouvées et probables sont de 69,3 millions de t de minerai contenant 13,7 % de zinc et 1,9 % de plomb.

- La plus grande mine de zinc au monde, jusqu'en 2008 et deuxième depuis, est celle de Red Dog, en Alaska. L'exploitation, à ciel ouvert, par [Teck](#), a démarré en 1990, le gisement avait été découvert en 1968. Les réserves prouvées et probables sont de 51,3 millions de t de minerai contenant 15,7 % de Zn, 4,0 % de Pb et 71 g/t d'argent. En 2012, la production a été de 529 100 t de Zn, 95 400 t de Pb et 712 t d'argent. 30 % de la production de concentrés est traité dans la raffinerie exploitée par Teck, à Trail, au Canada, en Colombie Britannique. L'épuisement de la mine principale (Red Dog "Main") est compensé par l'exploitation de gisements adjacents dont Red Dog "Aqqaluk" qui est également exploité à ciel ouvert.

Aux Etats-Unis, la production (13 mines en exploitation) provient, en 2011, à 85 %, d'Alaska avec la mine de Red Dog (529 000 t de Zn) et celle de Greens Creek exploitée par [Hecla Mining](#) avec 59 900 t de Zn.

- La troisième plus importante mine de zinc, propriété de [Minerals and Metals Group \(MMG\)](#) filiale du groupe chinois [China Minmetals Corporation](#), est celle de Century située en Australie, au nord-ouest de la province du Queensland. Le gisement, découvert en 1990, a été exploité à ciel ouvert à partir de 1999 et devrait être épuisé en 2016. En 2011, 5,3 millions de t de minerai ont été extraites pour produire, 197 251 t de zinc, 26 536 t de plomb et de l'argent. Les réserves sont de 30,2 millions de t de minerai contenant 11,2 % de zinc, 1,1 % de plomb et 20 g/t d'argent. La mine de [Mount Isa](#), également au nord-ouest de la province du Queensland, exploitée par [Xstrata](#) a produit, en 2012, 9,4 millions de t de minerai donnant 390 407 t de zinc, 153 116 t de plomb et 245 t d'argent. Ce complexe minier produit également du cuivre avec l'extraction, en 2012, de 6,3 millions de t de minerai donnant 142 705 t de cuivre raffiné. Les réserves prouvées et probables sont, fin 2011, de 31 millions de t de minerai de cuivre contenant 1,8 % de cuivre et de 24 millions de t de minerai de cuivre contenant 3,0 % de Cu ainsi que 30,1 millions de t de minerai de zinc contenant 4,9 % de zinc, 3,2 % de plomb et 63 g/t d'argent. En Australie, à 140 km au Nord-Ouest de Mount Isa a débuté, en 2012, la production de la mine souterraine Lady Loretta, exploitée par Xstrata, avec une production prévue, en 2016, de 160 000 t/an. Les réserves de cette mine sont de 12,7 millions de t renfermant 14,2 % de Zn, 4,8 % de Pb et 84 g/t de Ag.

- La quatrième plus importante mine de zinc est celle d'[Antamina](#) au Pérou, exploitée par Xstrata à 33,75 %, BHP-Billiton à 33,75 %, Teck à 22,5 % et Mitsubishi à 10 %. La mine est située dans la cordillère des Andes entre 4 200 et 4 700 m d'altitude, dans la province de Huari. Le minerai, extrait à ciel ouvert, est concentré puis mis en suspension dans l'eau et envoyé à l'aide d'un minéralduc de 302 km de longueur jusqu'au port de Punta Lobitos situé près de Port Huarmey afin

d'être exporté. Le minéral duc de 21 à 25 cm de diamètre est enfoui à 1 m de profondeur. Le trajet dure environ 50 h, avec une capacité de 2,5 millions de t/an. Les réserves prouvées et probables sont, en 2012, de 744 millions de t avec 0,93 % de Cu, de 512 millions de t avec 0,028 % de Mo et 89 g/t de Ag et 232 millions de t avec 2,1 % de Zn et 15,3 g/t de Ag, ainsi que du plomb et du bismuth. En 2012, la production est de 446 800 t de Cu, 219 000 t de Zn, 5 480 t de Mo, du plomb et de l'argent. La production a débuté en 2001 et devrait se poursuivre jusqu'en 2026.

- La plus importante mine souterraine de zinc est celle de [Brunswick](#), au nord de la province canadienne du Nouveau-Brunswick. Exploitée depuis 1960, ses réserves sont de 3,6 millions de t contenant 7,4 % de Zn, 2,8 % de Pb, 0,4 % de Cu et 92 g/t de Ag. La mine devrait être épuisée en 2013. L'exploitation est située à 1 125 m de profondeur. Exploitée par Noranda qui a fusionné avec Falconbridge en 2005 puis a été absorbé par Xstrata en 2006. En 2012, la production a été de 173 196 t de zinc contenu dans les concentrés, 45 969 t de plomb, 8 153 t de cuivre et 384 t d'argent.

- La plus importante mine européenne est celle de Tara en Irlande, exploitée par [New Boliden](#). En 2012, la mine a produit 166 021 t de Zn, 22 517 t de Pb et 1 673 kg de Ag. Les réserves sont de 14 millions de t de minerai contenant 7,2 % de Zn et 1,7 % de Pb.

Principaux producteurs : en 2012, en milliers de t de Zn contenu dans les concentrés miniers.

Vedanta Resources (Inde)	1 099	Votorantim (Brésil) en 2011	317
Xstrata (Suisse)	982	Nyrstar (Belgique)	312
Minmetals (Chine)	648	Cia Minera Volcan (Pérou)	306
Teck (Canada)	598	New Boliden (Suède)	271
Glencore (Suisse)	534	Sumitomo (Japon) en 2011	233

Source : rapports des sociétés

En mai 2010, Vedanta Resources qui exploite à Rampura-Agucha, dans le Rajasthan, en Inde, la plus importante mine au monde, a acquis les activités d'Anglo American dans le zinc et le plomb, avec les mines de Skorpion en Namibie (144 755 t de Zn en 2011-12), Lisheen en Irlande (183 206 t de Zn et 30 202 t de Pb) et Black Mountain en Afrique du Sud (31 770 t de zinc et 53 579 t de plomb).

Xstrata exploite des mines de zinc en Australie, dans le Queensland, à Mount Isa, 390 407 t de zinc en 2012, Mc Arthur River, 202 095 t, Lady Loretta, au Canada à Brunswick, 173 196 t et Perseverance, 125 174 t et au Pérou à Antamina avec 73 913 t.

Réserves mondiales : estimées, en 2012, à 250 millions de t en Zn contenu. En milliers de t.

Australie	70 000	Inde	12 000
Chine	43 000	Etats-Unis	11 000
Pérou	18 000	Kazakhstan	10 000
Mexique	16 000	Canada	8 000

Source : USGS

Situation française :

- Les mines, exploitées par Metaleurop, ont fermé en décembre 1991 pour les Malines (30) et en décembre 1993 pour [St Salvy](#) (81).

- Importation, en 2012, de 288 109 t de Zn contenu dans des concentrés, à 34 % de Bolivie, 8 % du Pérou, 7 % du Mexique, 7 % d'Allemagne.

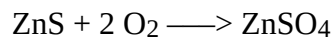
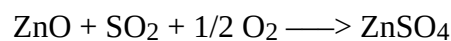
- Exportations, en 2012, 62 112 t de Zn contenu dans des concentrés vers la Belgique à 86 %, les Pays Bas à 14 %.

METALLURGIE DE PREMIERE FUSION en 2 étapes : grillage puis réduction.

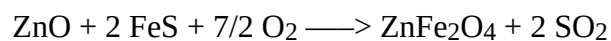
Grillage : il est réalisé par chauffage, à 900 - 1100°C, en présence d'air, selon la réaction :



Des réactions parasites sont susceptibles de se produire, principalement, la formation de sulfate selon des réactions qui ont lieu à 500 à 600°C, le sulfate formé étant décomposé vers 900°C :



Lorsque le concentré est riche en fer, ce qui est souvent le cas, il se forme des ferrites, oxydes mixtes de zinc et de fer, selon la réaction :



Ces ferrites sont insolubles dans l'acide sulfurique dilué utilisé lors des opérations hydrométallurgiques et leur présence a longtemps été un obstacle à ces opérations.

Le dioxyde de soufre formé, avec une teneur de 6 à 7 % dans le gaz évacué du grillage, est récupéré et transformé en acide sulfurique (2 t de H₂SO₄/t de Zn). Ainsi, les producteurs de zinc, ainsi que ceux de plomb, sont également producteurs d'acide sulfurique. A l'usine d'Auby, 99,5 % du SO₂ produit lors du grillage est transformé en H₂SO₄ selon le procédé de contact à double catalyse, la production a été, en 2008, de 195 653 t d'acide pour une production de 118 000 t de zinc.

Le minerai de zinc, après grillage, est appelé calcine.

La réalisation industrielle du grillage dépend des procédés métallurgiques de réduction utilisés par la suite.

- Si la réduction est effectuée par hydrométallurgie, il faut que la finesse initiale du concentré soit préservée afin de faciliter l'attaque acide. Il faut donc éviter tout frittage de la calcine et opérer plutôt à basse température (900-950°C). La présence de sulfate, en faible teneur, n'est pas gênante.

Le grillage en lit fluidisé est utilisé : les particules à griller sont mises en suspension dans de l'air qui est insufflé à travers des orifices, de 5 mm de diamètre, présents dans la sole du four. Le débit d'air est d'environ 10 m³/min/m² de sole. La combustion a lieu vers 900-950°C. La teneur résiduelle en soufre, principalement sous forme de sulfate, est de 1,5 à 2 %. En France, lors du grillage de ses concentrés de zinc, l'usine Nyrstar d'Auby (59) utilise ce procédé (procédé Vieille Montagne - Lurgi qui est le plus répandu dans le Monde). Le four de grillage de Nyrstar à Balen, en Belgique, est le plus important du monde (850 t de concentré/jour).

- Si la réduction est effectuée par pyrométallurgie (qui concerne les concentrés riches en plomb), selon des techniques proches de celles du haut fourneau, il faut que la calcine puisse supporter la charge du four et donc posséder une bonne résistance mécanique à l'écrasement tout en restant

poreuse pour que le monoxyde de carbone puisse la réduire. La calcine est agglomérée par frittage lors d'un grillage effectué à haute température (1000°C et plus). La teneur en soufre total (sous forme de sulfure et de sulfate) doit être la plus faible possible (< 0,5 %).

Le grillage sur machines Dwight et Lloyd est utilisé : ce type de grillage est également utilisé pour les concentrés de plomb qui sont, en général, réduits par pyrométallurgie. Les machines Dwight et Lloyd se présentent comme une bande sans fin de chariots mobiles munis de grilles, glissant sur des caissons étanches. L'air est soufflé à travers les grilles. La température de grillage est d'environ 1000°C (voir le chapitre consacré au [plomb](#)). La réaction de grillage étant très exothermique, afin d'éviter des températures trop élevées qui en faisant fondre le sulfure de plomb diminueraient la porosité de la charge, le concentré cru est dilué dans de la calcine déjà formée à des taux de 12 à 20 %.

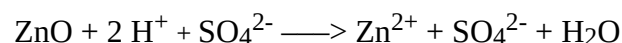
[Diaporama sur le grillage](#)

Réduction effectuée selon 2 procédés :

- Hydrométallurgique (concerne 90 % de la production).
- Pyrométallurgique (ou procédé thermique).

Hydrométallurgie : elle se déroule en 4 étapes.

- Lixiviation : la calcine est attaquée par une solution diluée d'[acide sulfurique](#) (180 à 190 g/L). Cette solution est récupérée, à la fin de l'électrolyse, pour être recyclée en amont des opérations hydrométallurgiques. Elle contient également de 30 à 50 g/L d'ions Zn^{2+} qui n'ont pas été récupérés totalement par électrolyse et qui sont ainsi recyclés. La dissolution est effectuée vers 55 à 65°C, la chaleur étant apportée par la dissolution des oxydes. L'oxyde de zinc passe en solution selon la réaction :



Les autres oxydes métalliques présents dans la calcine passent également en solution sauf l'oxyde de plomb qui donne du sulfate de plomb très peu soluble. Les métaux précieux, [argent](#) et [or](#), restent insolubles ainsi que, en général, la gangue, si celle-ci est siliceuse.

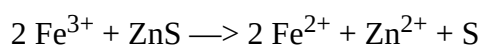
La dissolution de ZnO et des autres oxydes se traduit par une consommation d'acide et donc par une augmentation de pH. Cette dissolution dure de 1 à 4 heures et de 75 à 90 % du zinc passe en solution. Le zinc qui reste insoluble est celui qui, lors du grillage, a formé, avec l'oxyde ferrique, des ferrites. Ce zinc est récupéré par une opération complémentaire.

- Élimination des ions ferriques : lors de la lixiviation, appelée lixiviation neutre, le milieu est rendu oxydant par injection d'air ou de [dioxygène](#) ou par ajout de [dioxyde de manganèse](#) ou de [permanganate de potassium](#) afin, principalement, d'oxyder les ions Fe^{2+} , éventuellement présents, en ions Fe^{3+} . A ce stade, tous les ions Fe^{3+} ne sont pas dissous, une partie est incluse dans les ferrites insolubles. La solution passe, de façon continue, de cuves en cuves, le pH de la solution augmentant

progressivement, par ajout de calcine, pour atteindre 5 dans la dernière cuve. A ce pH, l'hydroxyde ferrique précipite. Une décantation permet de séparer la solution des résidus insolubles.

Le résidu solide peut contenir, si le minerai de départ est riche en fer, une part importante du zinc initialement présent dans le minerai. Il est nécessaire de récupérer ce zinc en attaquant ce résidu, à chaud, vers 90 - 95°C, par la solution d'acide sulfurique provenant de l'électrolyse. Dans ces conditions, la ferrite est dissoute et les ions contenus, Fe^{3+} et Zn^{2+} , passent en solution. Cette opération est appelée lixiviation acide.

Toute la difficulté de l'hydrométallurgie du zinc réside, pour les minerais riches en fer, ce qui est le cas de ceux actuellement exploités, dans l'élimination des ions ferriques. En effet, par élévation de pH, l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ précipite. Celui-ci peut être séparé d'une solution par décantation : c'est ce qui se produit lors de la "lixiviation neutre". Mais, si on souhaite, et cela est le cas industriellement, récupérer au maximum les ions Zn^{2+} de la solution, il est nécessaire de filtrer et de laver le précipité. Or, l'hydroxyde ferrique est très difficile, sinon impossible industriellement, à filtrer. Pour résoudre cette difficulté, plusieurs procédés sont utilisés, le plus employé a été longtemps celui dit "à la jarosite", les jarosites formant une famille de composés de formule $\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4\text{M}_2$ avec $\text{M} = \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{NH}_4^+, \text{Ag}^+, \text{H}_3\text{O}^+ \dots$ qui, par ailleurs ont été mises en évidence sur Mars, preuve de la présence d'eau au moment de la formation de ce minéral. Le procédé le plus employé actuellement est celui dit "à la goethite". La solution provenant de la lixiviation acide est traitée, à 95°C, par de la blende non grillée. Les ions Fe^{3+} sont réduits en Fe^{2+} selon la réaction :



Le résidu solide, contenant le soufre formé et la blende non dissoute, réintègre le circuit de traitement en amont du grillage.

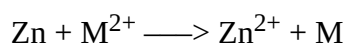
Le pH de la solution est augmenté, par ajout de calcine, pour atteindre environ 3, en présence de dioxygène pur ou d'air afin d'oxyder les ions Fe^{2+} . La réaction mise en jeu est la suivante :



Les ions Fe^{3+} précipitent sous forme de goethite $\text{FeO}(\text{OH})$ et sont ainsi éliminés de la solution qui contient moins de 1 g/L d'ions Fe^{3+} .

La solution issue de la lixiviation acide réintègre le circuit de traitement, en amont de la "lixiviation neutre". En même temps que les ions ferriques, les éléments suivants sont éliminés par précipitation : [Al](#), [Ga](#), [In](#), [Sb](#), [Sn](#), [As](#) et [Ge](#).

- Purification de la solution : après lixiviation, dans la solution, outre Zn^{2+} , les ions suivants sont encore présents : Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} . L'élimination de la plupart d'entre eux est effectuée par réduction à l'aide de poudre de zinc. L'emploi de zinc permet d'éviter l'introduction d'ions étrangers. Les ions Mn^{2+} , non réduits, resteront en solution, mais par contre, les autres ions seront réduits selon la réaction ($\text{M} = \text{Cu}, \text{Cd}, \text{Ni}, \text{Co}$) :



Les ions Cu^{2+} et Cd^{2+} sont très facilement réduits, cela est plus difficile pour Ni^{2+} et Co^{2+} qui demandent la présence d'activateurs et une température de 75 à 95°C. Ces métaux se déposent sur les particules de zinc, d'environ 30 micromètres de diamètre, en excès. La quantité de zinc utilisée dépend de la teneur en impuretés, elle varie de 16 à plus de 100 kg/t de zinc produit. Cette opération de purification, appelée cémentation, est réalisée, en continu, durant plusieurs heures (de 1 à 8 h). Une filtration sur toile très fine permet de récupérer les particules de zinc enrobées par les métaux déposés. Ce solide, appelé ciment, est traité afin de récupérer les métaux contenus et en particulier le zinc.

La teneur finale de la solution est, en général, pour chacun des ions Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , et Co^{2+} inférieure à 0,5 mg/L. La solution de Zn^{2+} , est ainsi purifiée des ions susceptibles de se déposer, par électrolyse, en même temps que Zn.

- Électrolyse : elle est réalisée, dans des cuves en ciment revêtue de PVC, vers 30 à 40°C. La solution contient initialement de 125 à 170 g/L de Zn^{2+} .

Les anodes sont en plomb (alliage contenant de 0,5 à 1 % de Ag) inattaquable en milieu sulfate, les cathodes sont en aluminium. L'intérêt de l'emploi de cathodes en aluminium réside dans le fait que celui-ci, au pH utilisé - vers 5, est recouvert par une couche d'alumine qui évite le contact direct du zinc déposé avec l'aluminium et ainsi la formation à l'interface d'un alliage qui empêcherait la récupération facile du zinc sans détérioration de la cathode.

La tension est comprise entre 3,2 et 3,7 V, avec une densité de courant de 400 à 700 A/m². L'intensité atteint jusqu'à 115 000 A.

Le zinc se dépose sur la cathode d'où il est décollé toutes les 24, 48 ou 72 heures par pelage (ou stripping). La production, par cellules qui contiennent jusqu'à 86 cathodes de 1,6 m², peut atteindre 3 t/jour. La consommation d'énergie est de 3 000 à 3 500 kWh/t de Zn produit. Le zinc obtenu très pur (99,995 %) contient moins de 50 ppm d'impuretés, la principale étant le plomb. Il n'a pas besoin de subir un raffinage ultérieur. Les ions Mn^{2+} qui restent dans la solution s'oxydent en MnO_2 sur l'anode en plomb.

La solution, après épuisement partiel (au 2/3) des ions Zn^{2+} et régénération de l'acide à l'anode, avec dégagement de dioxygène, est recyclée en amont des lixiviations neutre et acide.

Diaporama sur l'hydrométallurgie

Pyrométallurgie : concerne les minerais riches en plomb et en autres impuretés métalliques valorisables. La réduction a lieu dans des fours horizontaux ou verticaux par réduction avec le carbone ou selon le procédé Imperial Smelting par réduction avec le dioxyde de carbone (voir le chapitre consacré au plomb). Un raffinage du zinc d'œuvre (à 98,5 %) ainsi obtenu est nécessaire. La difficulté principale de la pyrométallurgie du zinc réside dans la température d'ébullition du zinc, 907°C, inférieure aux températures de réduction possibles thermodynamiquement avec le carbone ou le monoxyde de carbone. Le zinc, à l'état gazeux peut ainsi être rapidement réoxydé par le monoxyde ou le dioxyde de carbone formé. En conséquence, la vapeur doit être refroidie le plus rapidement possible (voir les diagrammes d'Ellingham dans le diaporama ci-dessous). La réduction par le carbone est cinétiquement facilitée par la formation de zinc gazeux mais le chauffage du four

doit être réalisé par l'extérieur de ce dernier afin d'éviter que les produits de la combustion, en particulier le dioxyde de carbone, réoxydent le zinc.

- Le raffinage est réalisé par distillations fractionnées selon le procédé New Jersey. Le plomb est éliminé dans une première colonne, puis [le cadmium](#) dans une seconde (température d'ébullition de Cd : 767°C). On obtient du zinc à 99,99 % qui est coulé en lingots de 25 kg.

[Diaporama sur la pyrométallurgie](#)

PRODUCTIONS METALLURGIQUES : primaires et secondaires, en 2011, en milliers de t.
Monde : 12 660, Union européenne : 2 020.

Chine	5 220	Australie	513
Corée du Sud	829	Espagne	489
Inde	795	Mexique	322
Canada	662	Kazakhstan	320
Japon	579	Pérou	314

Source : USGS

Les Etats-Unis ont importé, en 2012, 680 000 t de zinc, à 62 % du Canada, 12 % du Mexique, 9 % du Pérou, 8 % de Namibie.

La Chine a importé (importations nettes), en 2012, 509 000 t de zinc.

Groupes industriels : principaux groupes mondiaux, production 2012, en milliers de t.

Nyrstar (Belgique)	1 084	New Boliden (Suède)	467
Korea Zinc Group (Corée du Sud) en 2011	1 000	Huludao (Chine) en 2011	352
Xstrata (Suisse)	734	Glencore (Suisse) en 2011	302
Votorantim Metals (Brésil) en 2011	598	Teck Resources (Canada)	284
Vedanta Ressources (Inde)	904	Minmetals (Chine)	270

Source : rapports des sociétés

Mi-2007, regroupement des activités de raffinage du zinc et de production d'alliages de zinc des groupes Zinifex et Umicore pour créer le n°1 mondial [Nyrstar](#). En 2012, la production de Nyrstar a été de 1,084 million de t de zinc, 1,388 million de t d'acide sulfurique, 158 000 t de plomb, 13 000 t d'indium, 429 t d'argent, 1 742 kg d'or. La production de zinc est réalisée dans les usines de Balen (Belgique) avec 250 000 t, Hobart (Australie) avec 272 000 t, Budel (Pays-Bas) avec 257 000 t, Clarksville (Tennessee, Etats-Unis) avec 114 000 t, Auby (France) avec 161 000 t, Port Pirie (Australie) avec 31 000 t. Par ailleurs, Nyrstar possède des participations dans des usines chinoises, en particulier à Kunming (Yunnan).

[Principales usines européennes](#) : en 10³ t de capacités annuelles de production.

Allemagne	Nordenham (Xstrata) : 150	France	Auby (Nyrstar) : 160
Belgique	Balen (Nyrstar) : 270	Italie	Portovesme en Sardaigne (Glencore) : 210

Espagne	San Juan de Nieva (Xstrata) : 511	Norvège	Odda (New Boliden) : 160
Finlande	Kokkola (New Boliden) : 315	Pays-Bas	Budel (Nyrstar) : 260

L'usine de San Juan de Nieva, exploitée par l'[Asturiana de Zinc](#), propriété du groupe Xstrata, est l'usine de production de zinc la plus importante au monde avec, en 2012, 512 321 t.. Après son augmentation de capacité de 420 000 à 600 000 t/an, la raffinerie d'Onsan, en Corée du Sud, propriété du groupe Korea Zinc, devrait devenir la plus importante au monde.

RECYCLAGE et métallurgie de seconde fusion (affinage) : le zinc obtenu est appelé secondaire.

Le zinc récupéré après usage ainsi que les chutes et déchets des usines métallurgiques sont soit réutilisés directement, soit réemployés après refusion (c'est le cas, par exemple, des alliages de fonderie) soit encore retraité en suivant le circuit de la métallurgie de 1^{ère} fusion (c'est le cas, en particulier, des oxydes de zinc).

Le zinc recyclé représente 40 % de la consommation mondiale. En 2012, aux Etats-Unis, la production de zinc secondaire est de 150 000 t, à côté d'une production primaire de 115 000 t.

Sources de zinc recyclé neuf et usagé : par secteur industriel, en 2003, dans le monde occidental, en %.

Industrie du laiton	42 %	Zinc laminé	6 %
Galvanisation	27 %	Poussières d'aciéries	6 %
Fonderie	16 %	Industrie chimique	2 %

Le zinc contenu dans les laitons (600 000 t de Zn/an) est recyclé par l'industrie du [cuivre](#).

Le zinc de galvanisation se retrouve dans les [ferrailles](#) recyclées par la sidérurgie et peut être récupéré par traitement des poussières des aciéries électriques dans lesquelles Zn est sous forme de ZnO. 1 t d'acier produit 20 kg de poussières contenant de 15 à 30 % de Zn.

- L'usine Recytech, détenue à 50 % par [Recylex](#), à Fouquières-lez-Lens (62) traite, dans un four tournant selon le procédé Waelz, des poussières d'aciéries électriques, de fonderies et d'autres résidus zincifères pour récupérer, principalement de l'oxyde brut, appelé oxyde Waelz, contenant de 50 à 60 % de ZnO. La réduction est effectuée à l'aide de carbone, vers 1200°C. Le zinc se volatilise puis se réoxyde lors de son refroidissement. Cet oxyde est destiné à alimenter les usines de production de zinc raffiné.

SITUATION FRANCAISE : en 2012.

- Production de zinc raffiné : 161 000 t.

- Production de zinc recyclé (2007) : 75 000 t.

- Importations de Zn brut autres que déchets : 136 112 t des Pays Bas à 55 %, de Belgique à 17 %.
- Importations de déchets : 23 632 t à 87 % d'Espagne.
- Exportations de Zn brut autres que déchets : 81 899 t de Belgique à 93 %.
- Exportation de déchets : 42 178 t, vers l'Italie à 28 %, la Chine à 26 %, la Belgique à 25 %.
- Usines :

- Hydrométallurgie et grillage : Auby (59, Nyrstar). La production a été de 161 000 t de zinc et 13 000 t d'indium.

- Recyclage : [Recytech](#) (détenu 50/50 par [Befesa](#) et [Recylex](#).) à Fouquières-lez-Lens (62) qui recycle les poussières d'aciéries électriques, de fonderies et d'autres résidus zincifères. En 2012, traitement de 140 000 t de poussières et résidus de zinc pour produire 45 000 t d'oxyde brut (oxyde Waelz).

L'usine [Trez](#) (Traitement et Revalorisation Electrolytique du Zinc) installée à Aiguebelle (73), recycle 20 000 t/an de déchets d'usines de traitements de surfaces pour produire 3 000 t/an de poudre de zinc. Le procédé mis en œuvre est hydrométallurgique avec lixiviation basique, cémentation et électrolyse.

UTILISATIONS :

Consommations mondiales : en 2012, en milliers de t de Zn. Monde : 12 395, Union européenne : 2 352.

Chine	5 291	Japon	460
Etats-Unis	899	Italie (2007)	396
Inde	623	Belgique-Luxembourg (2007)	387
Corée du Sud	573	France (2007)	267
Allemagne (2007)	534	Mexique (2007)	250

Source : ILZSG

Répartition de la consommation :

	Monde en 2012	Etats Unis en 2012	France en 2007		Monde en 2012	Etats Unis en 2012	France en 2007
Galvanisation	50 %	55 %	49 %	Demi produits	6 %		35 %
Laiton	17 %	16 %	11 %	Usages chimiques	6 %	8 %	4 %
Autres alliages (Zamak...)	17 %	21 %	-	Autres produits	4 %		1 %

Source : USGS et ILZSG

En France, la production de demi-produits représente une part importante de la production, liée à l'utilisation importante des feuilles de zinc dans le bâtiment.

Dans le monde, en 2010, 51 % du zinc produit est employé dans la construction, 20 % les transports, 16 % les infrastructures, 7 % les équipements industriels, 6 % les biens de consommation.

Principales utilisations :

- Revêtements anticorrosion dans l'acier zingué, voir ce chapitre. On estime que 10 % de la production mondiale d'acier est zinguée (80 % galvanisée, 20 % électrozinguée).
- Bâtiment : outre les utilisations dans l'acier galvanisé (avec parfois des revêtements à l'aide des alliages 55 % Al, 43,5 % Zn, 1,5 % Si ou 95 % Zn, 5 % Al, utilisés pour les toitures de bâtiments industriels), le zinc est utilisé pur ou faiblement allié. Le zinc est protégé de la corrosion par une couche passive de carbonate-hydroxyde de zinc ($2ZnCO_3, 3Zn(OH)_2$). La vitesse moyenne annuelle de corrosion est de 1 micromètre en atmosphère rurale et de 10 micromètres en atmosphère industrielle. L'épaisseur moyenne du zinc laminé est de 0,7 mm. Des ajouts de Cu (0,1 % minimum) et Ti (0,05 % minimum) permettent de diminuer le coefficient de dilatation du zinc. Paris couvre ses toits, depuis le baron Haussmann, de zinc laminé : 5 millions de m² de surface.
- Fonderie : les alliages "Zamak" (ZA4G, ZA4U1G, ZA4U3G) contenant de 3,9 à 4,3 % de Al, ainsi que Cu jusqu'à 3,5 % et Mg jusqu'à 0,06 % représentent 90 % de la production d'alliages de zinc de fonderie. Autres alliages de fonderie : ZA 8, ZA 27, Ilzro 12, Kayem. Dans les automobiles les pompes à essence sont en Ilzro. Dans un véhicule automobile moyen, de type européen, entre 10,2 kg de zinc dont 4,9 kg d'alliages, 3,2 dans le zingage des tôles et 0,5 kg dans les pneus. En 2003, dans le monde, les secteurs d'utilisation de ces alliages sont les suivants :

Automobile	32 %	Vêtements	10 %
Construction	28 %	Jouets, sport	9 %
Télécom, électricité	18 %		

- Laitons : alliages avec Cu : 5 à 40 % de Zn (voir le chapitre cuivre). Le cuivre contenu dans le laiton confère à celui-ci un pouvoir bactéricide.

Autres applications :

- Anodes sacrificielles : 450 t/an en France pour protéger les coques de navires, les citernes enterrées...
- Poussière de zinc : pour la fabrication de l'aniline, la stabilisation de matières plastiques, la cémentation de métaux précieux, la purification ultime des solutions d'électrolyse (voir le paragraphe hydrométallurgie), comme agent réducteur dans la fabrication des hydrosulfites de sodium et de la formaldéhyde, comme revêtement protecteur de l'acier dans les procédés dits de matoplastie et de shérardisation.
- Sel, poudre et zinc laminé : pour les anodes des piles salines et alcalines. Dans ces piles, le pôle positif est relié à un mélange de dioxyde de manganèse et de carbone (voir le chapitre consacré au

[manganèse](#)). Les solutions d'électrolyte sont gélifiées (par de l'amidon) afin d'obtenir des piles sèches. Le pôle négatif est en zinc dont l'état dépend du type de pile.

Dans le cas des piles salines cylindriques, dans lesquelles l'électrolyte est soit du chlorure de zinc pur soit une solution fortement concentrée de $ZnCl_2$ et de NH_4Cl , le pôle négatif est constitué par un alliage de zinc (avec ajouts de [Pb](#) : 0,2 %) sous forme de godet. Le pôle positif est axial.

Dans le cas des piles alcalines, dans lesquelles l'électrolyte est [KOH](#), le pôle négatif, axial, est constitué par un crayon de zinc entouré d'un aggloméré de poudre de zinc et est en contact avec la partie inférieure de la pile. Le boîtier, en [acier](#), constitue le pôle positif.

- Au début des années 80, aux États-Unis, les pièces de 1 cent qui étaient traditionnellement en cuivre ont été remplacées par des pièces de zinc recouvertes de [Cu](#). La consommation de ces pièces est particulièrement importante, plusieurs milliers de t/an, du fait de la tradition de jeter ces pièces dans les fontaines.

- Organisme humain : besoins : 11 à 15 mg/j nécessaires à l'activité de plus de 300 enzymes. L'organisme d'un homme de 70 kg contient de 2 à 3 g de zinc. Sa déficience entraîne en particulier, le nanisme... 1/3 de la population mondiale est affectuée par un déficit en zinc ce qui entraîne 800 000 morts/an dans le monde.

Oxyde de zinc : préparé, soit par oxydation de produits de récupération et de déchets de zinc après vaporisation du zinc (procédé français), soit par réduction de concentrés miniers et combustion du zinc formé (procédé américain). Il entre dans la fabrication des [caoutchoucs](#) et pneumatiques car il accélère la vulcanisation, dans l'agriculture et l'alimentation animale (oligo-élément), en pharmacie (élément cicatrisant, crèmes pour protection UV), dans les varistances, les émaux et céramiques, les parafoudres moyenne tension du réseau électrique de l'[EDF](#). En 2012, la production mondiale est de 1,2 million de t.

- Secteurs d'utilisation de ZnO : en 2005, aux États-Unis, sur une consommation de 28 400 t de Zn contenu.

Pneumatiques et caoutchoucs	74 %	Lubrifiants	4 %
Produits chimiques	19 %	Céramiques	1 %
Peintures	6 %		

[Diaporama sur les utilisations du zinc](#)